

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



GÉPTERVEZŐK ÉS TERMÉKFEJLESZTŐK XXVII. SZEMINÁRIUMA

2011/7-8.

I. Kötet

88 oldal
LXII. évfolyam

Géptervezők és Termékfejlesztők XXVII. Szemináriuma

Gépipari Tudományos Egyesület Borsod-Abaúj-Zemplén megyei Géptervező Szakosztálya

MTA Miskolci Akadémiai Bizottsága

Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszék

MTA Miskolci Akadémiai Bizottságának Székháza (Miskolc, Erzsébet tér 3.)

2011. november 10. (csütörtök) – 11. (péntek)

GÉPTERVEZŐK ÉS TERMÉKFEJLESZTŐK

XXVII. SZEMINÁRIUMA

Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszék

H-3515 Miskolc-Egyetemváros

Telefon/fax: (0036)-46-327 643

e-mail: machpj@uni-miskolc.hu

A SZEMINÁRIUM SZERVEZŐI

Dr. KAMONDI LÁSZLÓ tanszékvezető egyetemi docens

Dr. habil. DÖBRÖCZÖNI ÁDÁM egyetemi tanár

Dr. PÉTER JÓZSEF egyetemi docens, a szeminárium titkára

Dr. SIPOSS ISTVÁN egyetemi docens

NÉMETH GÉZA egyetemi adjunktus

GERE ARANKA gazdasági ügyintéző

PETRÓNÉ TÓTH ILDIKÓ igazgatási ügyintéző

KORÁBBI RENDEZVÉNYEINK

Vezető konstruktőrök tanácskozása

Miskolc, 1973. augusztus 23-24.

Vezető konstruktőrök tanácskozása

Miskolc, 1975. július 23-24.

Géptervezők III. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1977. aug. 30-szeptember 1.

Géptervezők IV. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1980. augusztus 26-27.

Géptervezők V. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1982. augusztus 25-26.

Géptervezők VI. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1985. április 11-12

Géptervezők VII. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1989. május 29-31.

Géptervezők VIII. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1991. május 29-30.

Géptervezők IX. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1993. szeptember 30 – október 1.

Géptervezés '94 (Géptervezők X. Országos Szemináriuma)

Miskolc 1994. május 20.

Géptervezők XI. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1995. május 29-30.

Géptervezés-termékfejlesztés '96 (Géptervezők és Termékfejlesztők XII. Országos Szemináriuma)

Miskolc, 1996. május 24-25.

Géptervezők és Termékfejlesztők XIII. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1997. november 28.

Géptervezők és Termékfejlesztők XIV. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1998. december 15.

Géptervezők és Termékfejlesztők XV. Országos Szemináriuma

Miskolc, 1999. szeptember 30-október 1.

Géptervezők és Termékfejlesztők XVI. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2000. november 15-16.

Géptervezők és Termékfejlesztők XVII. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2001. november 8-9.

Géptervezők és Termékfejlesztők XVIII. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2002. november 7-8.

Géptervezők és Termékfejlesztők XIX. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2003. november 7-8.

Géptervezők és Termékfejlesztők XX. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2004. november 11-12.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXI. Országos Szemináriuma

Miskolc, 2005. november 10-11.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXII. Országos Szemináriuma

2006. november 9-10.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXIII. Országos Szemináriuma

2007. november 15-16.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXIV. Országos Szemináriuma

2008. november 6-7.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXV. Országos Szemináriuma

2009. november 5-6.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXVI. Szemináriuma

2010. november 10-11.

GÉPTERVEZŐK ÉS TERMÉKFEJLESZTŐK XXVII. SZEMINÁRIUMA

Miskolc, 2011. november 10-11.

PLENÁRIS ÜLÉS. I. emelet, Nagyterem

2011. november 10. (csütörtök), délelőtt

Elnök: Dr. Kamondi László tanszékvezető egyetemi docens, PhD.

10.00-10.05 Dr. Kamondi László tanszékvezető egyetemi docens, PhD., Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszék: Megnyitó

10.05-10.30 Dr. Goda Tibor egyetemi docens, PhD., Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezési Tanszék: A diszkrét elem módszer mérnöki alkalmazásáról

10.30-10.55 Dr. Jármái Károly egyetemi tanár DSc., Miskolci Egyetem Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék, Oláh Róbert okl. gépészmérnök, tudományos munkatárs, ADMATIS Kft.: Hegesztett szerkezetek analízise és

optimalítása hőfáradási szempont figyelembevételével

10.55-11.20 Dr. habil. Döbröczöni Ádám egyetemi tanár, CsC., Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszék: Dr. Magyar József egyetemi tanár szakmai és közéleti tevékenysége miskolci szemmel

11.20-11.45 Dr. habil. Kundrák János tanszékvezető egyetemi tanár, DSc., Dr. Gyáni Károly, ny. egyetemi docens, Dr. Deszpoth István, mérnök tanár, Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológiai Tanszék: Keményfelületek befejező megmunkálási eljárásainak összehasonlító vizsgálata az anyagleválasztási teljesítmény alapján

11.45-12.00 Dr. Péter József egyetemi docens, CsC., Németh Géza egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszék: Fogaskerék-hullámhajtómű laboratóriumi vizsgálata

12.00-14.00 Szünet

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

műszaki, vállalkozási, befektetési, értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczeni Ádám
elnök

Vesza József
főszerkesztő

Dr. Jármay Károly
Dr. Péter József
Dr. Szabó Szilárd
főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczi István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kulcsár Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Rittinger János

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

A szerkesztésben közreműködött:

Dr. Péter József

KEDVES OLVASÓ!

A Géptervezők és Termékfejlesztők XXVII. Szemináriumára jelentkezők száma több, mint az előző években megszokott volt, a publikálni szánt cikkek tématerülete pedig egyre gazdagabb. A hagyományosnak tekintett gépszerkesztési példák mellett egyre több az egészségügyi, orvosi eszközökkel, termékekkel foglalkozó cikk, szélesedik a beszállítói ipar termék-palettája is. Mindezek arra engednek következtetni, hogy a gépészmérnökök feladatai – karöltve a villamosmérnökökkel, informatikusokkal, anyagtudósokkal, orvosokkal és biológusokkal – sokasodnak, folyamatosan megújulnak, megtalálják az utat az autóiparhoz és a közlekedéshez, csakúgy, mint a mezőgazdaság, a környezetvédelem, az energiatermelés kisebb-nagyobb termelő és felhasználó egységeihez.

Ez azt is jelenti, hogy a mérnökök elhelyezkedése könnyebb és sikeresebb, ugyanakkor a munkavállalás, a mérnöki munka értékének elismertetése, nem ritkán a pénzbeli érték behajtása új feladatokat jelent. A gyorsan változó gazdasági és jogi-pénzügyi szabályozási környezet a vállalkozó mérnökök új, erőszakosabb piaci magatartását követeli meg.

Ezzel párhuzamosan a műszaki felsőoktatásban is javulnak a jelentkezők magukkal hozott ismeretei és nagyobb követelmények támaszthatók. Sokasodnak a mester szakokon tanulók és ha nagyon lassan is, de szaporodnak a doktori képzésben résztvevő mérnökök is, függetlenül attól, hogy a nyelveket beszélő, tehetséges mérnökpalántákra mind itthon, mind külföldön is „vadásznak”.

A mérnökképző egyetemeken a generációváltás lassan a végéhez ér, már felnőtt az a fiatal-középkorú oktatógárda, akik rövidesen átvesszik a „megharcolt” elődök feladatait. Ugyanakkor ez elődökre mindig tisztelttel tekintünk, mint akik a nem kevésbé változatos XX. század második felében mindannyiunkat tanítottak, akár egyetemi oktatóként, akár praktizáló mérnökként.

A nagy elődök egyike a nemrég elhunyt Dr. Magyar József tanszékvezető egyetemi tanár, akinek érdemeiről most, a Szemináriumon is megemlékezünk. 2012 januárjában pedig kiállítást szervezünk a tíz éve eltávozott Dr. Terplán Zénó professzor emlékére.

Mert professzoraink, oktatóink, a magyar műszaki egyetemeken aranyoklevelet szerzett mérnökeink emlékének megőrzése külön erőt adhat az utódok seregének.

Dr. Döbröczeni Ádám

A szerkesztésért felelős: Vesza József. A szerkesztőség címe: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Telefon/fax: +36-46/379-530, +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1027 Budapest, Fő u. 68. Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: 202-0656, fax: 202-0252, e-mail: a.gaby@gteportal.eu, internet: www.gte.mtesz.hu

A GÉP folyóirat internetcíme: <http://www.gepujsag.hu>

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Igaz Jenő ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Tel.: (46) 379-530, e-mail: gazdasz@chello.hu.

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Rt. Hírlap Üzletága 1008 Budapest, Orczy tér 1.

Előfizethető valamennyi postán, kézbesítőknél, e-mailen: hirlapelofizetes@posta.hu, faxon: 303-3440. További információ: 06 80/444-444

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

Külföldön terjeszti a Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat,
H-1389 Budapest, Pf. 149. és a Magyar Média, H-1392 Budapest, Pf. 272.

Előfizethető még közvetlenül a szerkesztőségben is.

INDEX: 25 343

ISSN 0016-8572

TARTALOM

1. Aczél Á.; Bojtár G.; Fehér L.; Keresztes D.: Versenyautó alváz térbeli rúdmodelljének végelelemes analízise	3	11. Élő G.: Innovatív problémamegoldási modell szuperszámítógépes szimulációval az INFCARE8 projekt példáján bemutatva	49
2. Antal D.; Szabó T.; Szilágyi A.: Ejtési teszt modellezése a tervezés fázisában	9	12. Handki A.; Tolvaj B.: Kísérleti stirling hűtő tervezése	52
3. Barcsák Cs.; Dr. Jármái K.: PSO algoritmus bővítése optimáláshoz, véges differencia alapú gradiens becsléssel	13	13. Horváth P.; Törőcsik D.: Magnetorheológ tengelykapcsoló optimalizálási lehetőségei	56
4. Bihari Z.; Dr. Sente J.: Külső csillagkereskes Görgős szabadonfutók egy tengelyűségének vizsgálata	17	14. Illés B.; Németh J.: Automatizált daru teherlengése csillapításának egy lehetséges módja	60
5. Bihari J.; Kamondi L.: Kis méretű műanyag fogaskerek vizsgálat	21	15. Jakab E.; Lénárt J.: CNC lemezmegmunkáló gépek	68
6. Czifra Á.: Műszaki felületek fraktál alapú vizsgálata	25	16. Jármái K.; Oláh R.: Hegesztett szerkezetek analízise és optimalása hőfáradási szempont figyelembevételével	72
7. Daróczy L.; Dr. Jármái K.: Új eljárás rácsos tartók topológiai optimalására	29	17. Kota L.; Jármái K.: Műszaki felügyeleti és karbantartó rendszerek optimalása	75
8. Drágár Zs.; Dr. Kamondi L.: Nem szabványos alapprofílu fogaskerek tervezésének kérdései	35	18. Kovács B.; Nándoriné Tóth M.: Robotok inverz feladatának megoldása	79
9. Ecsedi I., Baksa A.: Anizotróp anyagú prizmatikus rudak Saint-Venant csavarási feladata	39	19. Kovács Gy.; Jármái K.: Kompozit szendvicsszerkezet optimális tervezése rugalmas tolerancia módszerrel	83
10. Égert J.; Aczél Á.; Fehér L.; Körmendy Á.: Versenyautó alváz mechanikai modellezési lehetőségei és kritikus terhelései	43		

KOMPOZIT SZENDVICSSZERKEZET OPTIMÁLIS TERVEZÉSE RUGALMAS TOLERANCIA MÓDSZERREL

OPTIMAL DESIGN OF A COMPOSITE SANDWICH STRUCTURE BY FLEXIBLE TOLERANCE METHOD

Kovács György PhD, Jármái Károly DSc
Miskolci Egyetem

ABSTRACT

This study shows the optimization method of a new complex structural model [laminated carbon fiber reinforced plastic (CFRP) deck plates with aluminium (Al) stiffeners] which is depicted in Figure 1. The structure was designed for both minimal cost and minimal weight taking into consideration 7 design constraints.

1. BEVEZETÉS

A kompozitok több szempontból fontos anyagok a mérnöki gyakorlatban, a műszaki célú szerkezeti anyagok legkorszerűbb családját képezik. A tulajdonságok olyan széles skálájával rendelkeznek, melyek más anyagokkal elérhetetlenek, mint például a nagy szilárdság, kis sűrűség, korrózióval és vegyi anyagokkal szembeni ellenállás, kedvező hajlítási merevség, jó rezgéscsillapítás, esztétikus megjelenés. A kompozitokat – ezen tulajdonságaiknak köszönhetően – jelenleg is számos iparágban (úrkutatás, hadiipar, járműipar, építőipar, gépípar, vegyipar, egészségügy) alkalmazzák.

Számos szakirodalom foglalkozik a szendvicsszerkezetek vizsgálatával, tervezésével és alkalmazásával, mint például [3, 4, 6, 7, 8, 9].

A jelenlegi tanulmányban vizsgált többcellás kialakítású tartó, a szendvicsszerkezet és a cellalemez kombinációja (1. ábra). A szendvicsszerkezetek fém, vagy szálerősítéses műanyag fedőlemezekből állnak, a közbenső réteg pedig általában hab, vagy méhsejtváz. Ezzel szemben a cellalemezeket fém fedőlemezek és a köztük hegesztett fém merevítők alkotják.

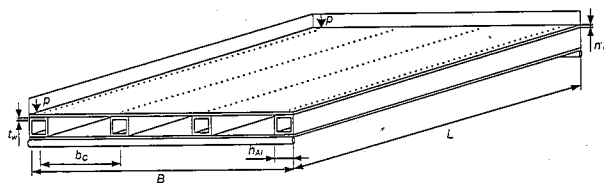
A megalkotott új szerkezeti modell 2 CFRP (carbon fiber reinforced plastic, szálerősítéses műanyag) fedőlemezből, és köztük több alumínium üreges négyzetű szelvényű hosszmerítő csőből áll. Így

a megalkotott új modell az anyagok, merevítők és a gyártási technológiák kombinációja.

A dolgozat célja az új szerkezet optimálási mód-szerének kidolgozása. A kidolgozott célfüggvények költség- és tömeg-célfüggvények. A számítás során a teljes szerkezet középlehajlására, a kompozit lemezek horpadására, az Al merevítő cső gerinchorpadására, a kompozit lemezben ébredő maximális feszültségre, az Al csőben keletkező maximális feszültségre, a szerkezet sajátfrekvenciájára vonatkozó méretezési feltételek, valamint a fedőlemez rétegszámára (n), az alkalmazott bordaszám-ra (n_s) és a borda geometriájára (h_{Al} , t_w) vonatkozó méretkorlátozási feltételek lettek figyelembe véve. Az egycélűfüggvényes optimálás során a rugalmas tolerancia (Flexible Tolerance) módszere került alkalmazásra.

2. AZ ÚJ TÖBBCELLÁS SZENDVICSSZERKEZET

A vizsgált többcellás szendvicsszerkezet az 1. ábrán látható. A CFRP fedőlemezek laminált réteges szerkezetek. Az egyes kompozit rétegek szál térfogat aránya 61%, a mátrix térfogat aránya pedig 39%. Az egyes rétegekben a karbonszál erősítés hosszirányban került elhelyezésre. A fedőlemezek szegecselelssel lettek az alumínium négyzetű keresztmetszetű merevítő bordák (SHS) alsó és felső övlemezéhez rögzítve.



1. ábra. Többcellás cellalemez

Az optimálás célja egy $L = 2250$ mm hosszúságú, $B = 2000$ mm szélességű, $p = 3,5 \cdot 10^{-3}$ N/mm² felü-

leten megoszló ($p = 7 \text{ N/mm}$ vonalmenti) terhelésű cellalemez optimális szerkezeti méreteinek meghatározása.

A fedőlemezek összeállítása során felhasznált előimpregnált CFRP rétegek anyagjellemzői az alábbiak: az egyes rétegek vastagsága $t^* = 0,2 \text{ mm}$, a rugalmassági modulus hosszirányban $E_x = E_c = 120 \text{ GPa}$, keresztirányban pedig $E_y = 9 \text{ GPa}$. A CFRP réteg fajlagos tömege $\rho_c = 180 \text{ g/m}^2$, Poisson tényezői $\nu_{xy} = 0,25$ és $\nu_{yx} = 0,019$.

3. CÉLFÜGGVÉNYEK ÉS MÉRETEZÉSI FELTÉTELEK

3.1. Költségfüggvény, mint célfüggvény

Általában a leggyakoribb követelmény, hogy a szerkezet gazdaságos legyen, vagyis törekedni kell a költségminimumra. A költségfüggvény a vizsgált többcellás kompozit lemez esetén az anyag és a gyártási költségek összegeként írható fel [2]:

$$f(x) = K = K_{CFRP} + K_{Al} + K_{hőkezelés} + K_{gyártás}$$

$$K(\epsilon) = 2 \cdot (n \cdot 31,047) + k_{Al} [n_s (\rho_{Al} 4 h_{Al} t_w L)] + 2 \cdot n \frac{525}{528} + k_f [n \cdot 14_{\min} + n_s \cdot 26_{\min} + 110_{\min}] \quad (1)$$

ahol n a CFRP rétegek számát jelenti, n_s a merevítő bordák száma, ρ_{Al} az Al profilok sűrűsége, h_{Al} az Al profilok magassága és szélessége, t_w pedig a falvastagsága, min pedig a percben kifejezett gyártási folyamatok.

A szerkezet anyagköltségének jelentős részét a kompozit fedőlemezek teszik ki. Esetünkben ez a költség a 31,047 €/réteget jelenti. Az Al bordák költsége 4,94 €/kg. A fajlagos gyártási költség $k_f = 0,6 \text{ €/min}$. A hőkezelés költsége a kezelendő fedőlemezek méretétől és a mátrix-gyanta típusától függ. Esetünkben ezen költségkomponens a fedőlemez rétegszám és méret függvényeként számítható. Egy általunk már korábban legyártott $220 \times 1200 \times 2 \text{ mm}$ méretű CFRP fedőlemez költségét ismerjük, mely alapján a számítási példában szereplő méretű lemez költsége már származtatható az (1) egyenletben látható módon.

A teljes gyártási költség (mint az idő függvénye [min]) a CFRP lemezek gyártásához szükséges idő ($n \cdot 14_{\min} + 110_{\min}$), az Al bordák vágási idő ($n_s \cdot 6_{\min}$), valamint a szerkezet összeállítási idő ($n_s \cdot 20_{\min}$) költségének összegeként adódik. A CFRP lemezek gyártásához szükséges idő magába foglalja a présformák előkészítésének, az egyes rétegek leszabá-

sának és a rétegek összeállításának időtartamait. A szerkezet összeállításának ideje a CFRP rétegek és az Al merevítő fűrészből és össze-szegecseléséből tevődik össze. A furatok elkészítésének ideje a rétegszám függvénye.

Az optimalizáló paraméterek az Al borda geometriája (h_{Al} , t_w), a CFRP fedőlemezek rétegeinek száma (n), valamint a merevítő bordák száma (n_s). A szálirány valamennyi rétegben (0°), mint az már korábban is meg lett adva.

3.2. Szerkezettömeg, mint célfüggvény

A szerkezet teljes tömege a CFRP és az Al komponensek tömegének összegeként írható fel:

$$m = 2 \rho_c [B L (n t^*)] + n_s \rho_{Al} [L (4 h_{Al} t_w - 4 t_w^2)] \quad (2)$$

ahol: t^* az egyes rétegek vastagsága, a fedőlemez sűrűsége $\rho_c = 180 \cdot 10^{-9} \text{ kg/mm}^2$, az alkalmazott AlMgSi05 négyzetcső sűrűsége pedig $\rho_{Al} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$.

3.3. Méretezési feltételek

3.3.1. A szerkezet középlehajlása

$$w_{\max} = \frac{5p L^4}{384(E_c I_c + E_{Al} n_s I_{Al})} + \frac{5\Delta M L^2}{48(E_c I_c + E_{Al} n_s I_{Al})} \leq \frac{L}{200} \quad (3)$$

ahol: I_c és I_{Al} a kompozit lemez és az Al borda inerciaja,

E_c és E_{Al} a CFRP laminát redukált rugalmassági modulusa, valamint az Al borda rugalmassági modulusa.

A szerkezet teljes lehajlásának számításánál számolnunk kell a szerkezeti elemek relatív elmozdulásból adódó járulékos lehajlással is. A $\Delta\sigma$ feszültségkülönbségből adódóan ΔM nyomatékkülönbség is jelentkezik. A szerkezet teljes lehajlása tehát a számított elsődleges lehajlás és a szerkezeti elemek relatív elmozdulásából adódó lehajlás összegeként írható fel.

3.3.2. A kompozit lemez horpadása [1]

$$\left(\frac{b_c}{n t^*}\right) \leq \sqrt{\frac{\pi^2}{6\sigma_{\max}(1-\nu_{xy}\nu_{yx})}} \left[\sqrt{E_x E_y} + E_x \nu_{xy} + 2G_{xy}(1-\nu_{xy}\nu_{yx}) \right] \quad (4)$$

ahol b_c : a bordák közötti lemezszélesség, σ_{\max} : a kompozit laminátban a terhelés hatására ébredő maximális feszültség, E_x , E_y , G_{xy} : a kompozit laminát modulusai, ν_{xy} , ν_{yx} : Poisson tényezők.

3.3.3. Az Al cső gerinchorpadása [2]

$$\frac{h_{Al}}{t_w} \leq 42 \sqrt{\frac{235 E_{Al}}{240 E_{Steel}}} \quad (5)$$

ahol: E_{Al} , E_{Steel} az alumínium és az acél rugalmasági modulusa.

3.3.4. Feszültségi feltétel a kompozit lemezre

A szerkezetre ható terhelésből adódó nyomaték megoszlik a szerkezet CFRP és Al teherviselő komponensei között. $X_c M$ a teljes nyomaték kompozit lemezre eső része, az $X_{Al} M$ pedig a merevítőre eső rész.

$$\frac{X_c M}{I_c} \cdot \frac{h_{Al} + nt}{2} \leq \sigma_{Call} \quad (6)$$

ahol: $M = \frac{pL^2}{8}$; $\sigma_{Call} = \frac{\sigma_T}{\gamma_c}$ a megengedett feszültség;

$X_c M$ a kompozit lemezre eső nyomaték; σ_T a kompozit laminát szakító szilárdsága; γ_c a biztonsági tényező ($=2$).

A merevítő bordák nagy számából adódóan az optimalálás során a keresztirányú hajlításból származó feszültséggel nem kell számolni.

3.3.5. Feszültségi feltétel az Al csőre

$$\frac{X_{Al} M}{n_s I_{Al}} \cdot \frac{h_{Al}}{2} \leq \sigma_{Alall} \quad (7)$$

ahol: $X_{Al} = \frac{E_{Al} n_s I_{Al}}{E_{Al} n_s I_{Al} + E_c I_c}$; $\sigma_{Alall} = \frac{f_y}{\gamma_{Al}}$

a megengedett feszültség; $X_{Al} M$ az Al merevítőre eső nyomaték; f_y az Al folyáshatára; γ_{Al} a biztonsági tényező ($=2$).

3.3.6. Sajátfrekvencia feltétel

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{10^3 (E_{Al} I_{Al} + E_c I_c)}{m}} \geq f_0 \quad (8)$$

m : tömeg/folyóméter [kg/m]; f_0 : korlátozás a sajátfrekvenciára (50 Hz).

3.3.7. Méretkorlátozási feltételek

$$\begin{aligned} 10 &\leq h_{Al} \leq 100 \\ 2 &\leq t_w \leq 6 \\ 16 &\leq n \leq 32 \\ 7 &\leq n_s \leq 20 \end{aligned} \quad (9)$$

A fenti méretkorlátozási feltételek gazdaságossági és gyárthatósági szempontok alapján kerültek meghatározásra, valamennyi változó dimenziója [mm].

3.4. Rugalmas Tolerancia Optimaló Módszer (Flexible Tolerance Optimization Method)

Az optimalálás során a rugalmas tolerancia módszert alkalmaztam, mely egy véletlen kereső módszer [5].

Minimálja az $f(x)$ függvényt,

a $\Phi^{(k)} - T(x) \geq 0$ feltételek teljesülése mellett,

ahol $\Phi^{(k)}$ a rugalmas tolerancia kritérium értéke a keresés k -edik lépésénél, $T(x)$ pozitív funkcionál, mely a megsértett egyenlőségi és/vagy egyenlőtlenségi feltételekből kerül meghatározásra.

4. EGYCÉLFÜGGVÉNYES OPTIMALÁLÁS NUMERIKUS EREDMÉNYEI

4.1. Költség optimalálás

Szendvicsszerkezetek tervezése során a költséghatékonyság az elsődleges tervezési cél tekintettel arra, hogy a kompozit szerkezetek anyagköltsége igen magas. Az 1. táblázat tartalmazza a vizsgált szerkezet költség optimalálásának eredményeit, mely az (1) egyenlet alapján, valamint a (3-9) méretezési feltételek figyelembe vételével lett elvégezve. A különböző (16-32 db) kompozit fedőlemez rétegszámokhoz tartozó optimális szabványos szelvényméretek és bordaszámok, valamint költségek az alábbiak szerint adódtak:

1. táblázat. A költség optimalálás eredménye

Rétegek száma	Optimális, szabványos szelvényméretek és bordaszám			Költség [e]
	h_{Al} [mm]	t_w [mm]	n_s [mm]	
16	60	2.5	15	1730
18	60	2.5	14	1841
20	60	2.5	12	1919
22	55	2.5	11	2014
24	55	2.5	10	2126
26	60	2.5	8	2219
28	50	2.5	8	2340
30	45	2	8	2452
32	45	2	7	2570

Összegzésként elmondható, hogy a fedőlemez rétegszámának növelésével a szerkezet teljes költsége is rohamosan nő. Költség szempontjából optimálisnak a 16 rétegű fedőlemez 15 db

60x60x2,5 mm geometriájú merevítőbordás szerkezet adódott.

4.2. Tömeg optimalálás

A vizsgált szerkezet tömeg optimalálása a (2) tömeg-célfüggvény alapján, a (3-9) méretezési feltételek figyelembe vételével lett elvégezve. A tömeg-célfüggvény szerinti optimalálás során kapott különböző kompozit fedőlemez rétegszámokhoz (16-32 db) tartozó optimális szabványos szelvényméreteket és bordaszámokat a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. A tömeg optimalálás eredménye

Rétegek száma	Optimális, szabványos szelvényméretek és bordaszám			Tömeg [kg]
n [db]	h_{Al} [mm]	t_w [mm]	n_s [mm]	
16	60	2.5	15	78.317
18	60	2.5	14	78.064
20	55	2.5	13	73.862
22	55	2.5	11	70.723
24	55	2.5	10	70.8
26	50	2.5	9	68.1
28	50	2.5	8	66.445
30	45	2	8	65.32
32	45	2	7	66.469

Látható, hogy a fedőlemez rétegszámának növelésével a szerkezet tömege csökken. Tömeg szempontjából optimálisnak a 30 rétegű fedőlemezes, 8 db 45x45x2 mm geometriájú merevítőbordás szerkezet adódott.

Azonban azt is meg kell jegyezni, hogy a rétegszám növelésével a szerkezet tömege bár csökken, azonban a szerkezet előállításának költsége nagymértékben nő.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Egy új szerkezeti modell szerkezetoptimalálási módszere került bemutatásra. A szerkezet laminált karbonszál-erősítéses fedőlemezekből és Al merevítőkből szegecseléssel került összeállításra. A tervezés során az optimális bordaszám és borda geometria, valamint az optimális kompozit fedőlemez rétegszám került meghatározásra, mely szerkezet biztosítja a minimális költséget és/vagy tö-

meget amellet, hogy teljesíti a megfogalmazott méretezési feltételeket is.

Összefoglalásként elmondható, hogy ezen típusú szendvicsszerkezet számos mérnöki teherviselő szerkezetben (vízi-, közúti-, légi járművek; híd; hajófedém; épület padozat, stb.) alkalmazható, ahol a tömegmegtakarítás az elsődleges cél.

A kompozit szerkezetek további előnyös tulajdonságai a rezgéscsillapítás, a hő- és hangszigetelő képesség, valamint a korrózióállóság, melyeknek köszönhetően rohamosan terjed a felhasználási körük és mértékük.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A kutatást az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok támogatta az OTKA T 75678 számú projekt keretében.

IRODALOM

- [1] Barbero E. J. (1999) *Introduction to composite materials design*, USA: Taylor & Francis.
- [2] Farkas, J.; Jármái, K. (1997) *Analysis and optimum design of metal structure*, Balkema: Rotterdam-Brookfield.
- [3] Farkas, J.; Jármái, K. (1998) *Minimum material cost design of five-layer sandwich beams*. Structural Optimization 15 No.3-4, pp.: 215-220
- [4] Farkas, J.; Jármái, K. (2003) *Economic design of metal structures*. Rotterdam: Millpress.
- [5] Himmelblau, D.M. (1972): *Applied nonlinear programming*. McGraw-Hill, New York.
- [6] Jármái, K.; Farkas, J.; Petershagen, H. (1999) *Optimum design of welded cellular plates for ship deck panels*. Welding in the World 43 No.1, pp.: 51-54
- [7] Noor, A. K.; Burton, W.S.; Bert, C. W. (1996) *Computational models for sandwich panels and shells*. Appl. Mech. Rev. 49 No. 3, pp.: 155-199
- [8] Vinson, J. R. (2001) *Sandwich structures*, Appl. Mech. Rev. 54 No. 3, pp.: 201-214
- [9] Zenkert, D. (1995) *An introduction to sandwich construction*, W Midlands: EMAS Publ.